

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daya Listrik

Menurut von Meier (2006), Daya didefinisikan sebagai jumlah energi yang digunakan per satuan waktu. Ini merujuk pada total energi listrik yang diperlukan untuk melakukan pekerjaan dalam sistem tenaga listrik. Watt adalah satuan standar untuk daya listrik. Ada tiga jenis daya dalam sistem tegangan AC, yaitu daya aktif (daya nyata) yang dilambangkan dengan (P) dan diukur dalam Watt (W), daya reaktif yang dilambangkan dengan (Q) dan diukur dalam volt-ampere reaktif (VAR), serta daya semu yang dilambangkan dengan (S) dan diukur dalam volt-ampere (VA).

2.1.1 Daya Semu

Daya semu (*apparent power*) merupakan daya listrik yang mencakup kombinasi daya aktif (*real power*) dan daya reaktif. Pengukuran daya semu dilakukan dalam *volt-ampere* (VA). Daya semu adalah ukuran total arus listrik yang dibutuhkan oleh suatu sistem. Menghitung dan mengelola daya semu merupakan langkah penting dalam merencanakan dan mengoptimalkan penggunaan energi dalam suatu sistem listrik. Dengan menggunakan faktor daya yang tinggi, kita dapat mencapai efisiensi energi. Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2 merupakan persamaan untuk menghitung daya semu.

$$S = \sqrt{3}.V.I \quad (2.1)$$

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (2.2)$$

Keterangan :

S : Daya Semu (VA)
 P : Daya Aktif (W)
 V : Tegangan (V)
 I : Arus (A)

2.1.2 Daya Reaktif

Daya reaktif merujuk pada komponen dari daya listrik yang tidak diubah menjadi pekerjaan nyata, melainkan diubah menjadi medan magnetik atau elektromagnetik. Daya reaktif muncul karena adanya komponen induktif (seperti induktor) dan kapasitif (seperti kapasitor) dalam suatu sistem listrik. Komponen induktif menyebabkan adanya perbedaan antara tegangan dan arus, sementara komponen kapasitif menyebabkan perubahan fase antara tegangan dan arus. Daya reaktif diukur dalam *volt-ampere reactive* (VAR) dan dapat memiliki dampak pada efisiensi sistem tenaga listrik. Dalam analisis, daya reaktif induktif dan kapasitif memiliki arah yang berlawanan, sehingga mereka saling mengurangi. Hubungan antara daya reaktif dan daya semu dijelaskan oleh persamaan yang mencerminkan komponen-komponen tersebut dalam sistem listrik. Persamaan 2.3 merupakan cara untuk menghitung daya reaktif.

$$Q = \sqrt{3}.V.I.Sin \varphi \quad (2.3)$$

Keterangan :

Q : Daya Reaktif (VAR)
 V : Tegangan (V)
 I : Arus (A)
 Sin φ : Faktor Daya

2.1.3 Daya Aktif

Daya aktif merujuk pada bagian dari daya listrik yang diubah menjadi daya nyata atau energi yang digunakan dalam suatu sistem seperti menggerakkan mesin, memanaskan suatu objek, atau mendorong beban listrik. Daya aktif dihasilkan oleh komponen resistif dalam suatu sirkuit, seperti resistor, yang mengubah energi listrik menjadi bentuk kerja atau panas. Daya aktif diukur dalam watt (W) dan merupakan parameter penting dalam mengevaluasi efisiensi penggunaan daya dalam sistem tenaga listrik. Dalam analisis, daya aktif dapat dibedakan dari daya reaktif, yang merupakan komponen lain dari daya listrik dengan sifat yang berbeda. Daya aktif merupakan indikator utama dari seberapa efisien suatu sistem dapat mengonversi daya listrik menjadi bentuk kerja yang bermanfaat. Persamaan 2.4 digunakan untuk menghitung daya aktif.

$$P = \sqrt{3}.V.I.Cos \varphi \quad (2.4)$$

Keterangan :

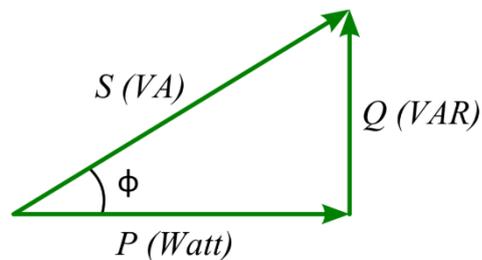
P : Daya Aktif (Watt)
V : Tegangan (V)
I : Arus (A)
Cos φ : Faktor Daya

2.1.4 Segitiga Daya

Segitiga daya adalah konsep geometris yang menggambarkan hubungan antara tiga jenis daya listrik: daya aktif, daya reaktif, dan daya semu. Daya aktif adalah daya yang digunakan untuk melakukan pekerjaan oleh beban listrik, seperti lampu, setrika, atau mesin. Daya reaktif adalah daya yang diperlukan untuk menciptakan medan magnet pada beban induktif, seperti motor, transformator, atau

kipas angin. Daya semu adalah daya total yang disuplai oleh sumber daya, seperti PLN atau generator.

Segitiga daya dapat digunakan untuk menghitung nilai ketiga jenis daya tersebut dengan menggunakan prinsip trigonometri. Dalam segitiga daya, daya aktif (P) adalah sisi yang berlawanan dengan sudut ϕ , daya reaktif (Q) adalah sisi yang berdekatan dengan sudut ϕ dan daya semu (S) adalah sisi miring. Sudut ϕ adalah sudut antara arah arus dan tegangan, juga dikenal sebagai faktor daya ($\text{Cos } \phi$). Gambar 2.1 merupakan bentuk dari segitiga daya.



Gambar 2. 1 Segitiga Daya
Sumber : (Angga et al., 2021)

Untuk menghitung segitiga daya dapat dengan menggunakan Persamaan 2.5, Persamaan 2.6, dan Persamaan 2.7.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.5)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.6)$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (2.7)$$

Keterangan :

S : Daya Semu (VA)
P : Daya Aktif (Watt)
Q : Daya Reaktif (VAR)

2.2 Faktor Daya

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu/daya total (VA). Faktor daya juga dapat didefinisikan sebagai nilai *cosinus* sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total. Faktor daya juga disebut sebagai faktor kerja atau $\text{Cos } \varphi$. Faktor daya digunakan untuk mengetahui tingkat efisiensi energi pada suatu beban listrik. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu. Agraekar (2020) mengemukakan bahwa umumnya penyebab faktor daya rendah adalah beban induktif, karena pada beban induktif arus tertinggal dari tegangan atau disebut *lagging*, oleh karena itu faktor daya menurun. Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi. Perbaikan faktor daya ini dapat dilakukan dengan menggunakan kapasitor. Berdasarkan SPLN 70-1, standar faktor daya ($\text{Cos } \varphi$) adalah sebesar $\geq 0,85$, apabila nilai dari faktor daya kurang dari standar maka akan dikenakan denda kepada pelanggan yang menyebabkan penggunaan listrik tidak efisien dan biaya yang ditanggung oleh pelanggan membengkak.

Faktor daya dapat dihitung dengan Persamaan 2.8 :

$$\text{Cos } \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.8)$$

Keterangan :

$\text{Cos } \varphi$: Faktor Daya
 P : Daya Aktif (Watt)
 S : Daya Semu (VA)

Kisaran nilai untuk faktor daya adalah 0 hingga 1. Efisiensi energi listrik meningkat ketika mendekati angka 1. Daya reaktif atau daya yang tidak dapat

digunakan oleh perangkat namun tetap harus dibayar oleh pelanggan, ditunjukkan oleh faktor daya yang rendah.

Beban induktif adalah beban yang menggunakan energi reaktif dari sumber daya. Untuk menciptakan *fluks* magnetik pada perangkat listrik seperti transformator, motor induksi, dan kapasitor. Apabila faktor daya lebih kecil dari 0,85 maka daya aktif (kW) akan ikut berkurang karena mengikuti antara rasio daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVAR). Kapasitas itu akan terus menurun seiring dengan penurunan faktor daya sistem kelistrikan. Akibat penurunan faktor daya, maka akan muncul beberapa masalah, antara lain :

1. Penggunaan daya listrik kWh meningkat karena kerugian
2. Penggunaan daya listrik kVAR meningkat
3. Mutu listrik menurun karena jatuh tegangan

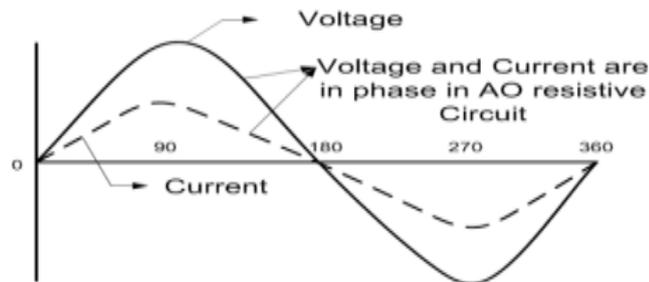
2.3 Jenis Beban Listrik

Ada tiga jenis beban listrik, yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Beban resistif hanya memerlukan daya aktif, beban induktif memerlukan daya aktif dan daya reaktif, dan beban kapasitif memerlukan daya aktif dan mengurangi daya reaktif. Hal ini penting untuk menjamin kestabilan dan efisiensi sistem kelistrikan.

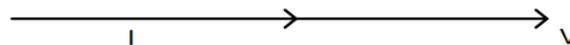
2.3.1 Beban Resistif

Beban Resistif yang merupakan hambatan murni, beban jenis ini terdapat pada bola lampu dan *Heater*. Beban ini hanya mengonsumsi daya aktif dan tidak mengonsumsi daya reaktif. Bentuk gelombang dari beban resistif ini dapat dilihat pada Gambar 2.2, kemudian untuk bentuk vektor arus dan tegangan dari beban

resistif adalah pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 2 Gelombang Resistif
Sumber : (Ritonga, 2019)



Gambar 2. 3 Vektor Arus dan Tegangan Beban Resistif
Sumber : (Ritonga, 2019)

Menghitung beban resistif dapat dengan menggunakan Persamaan 2.9 ini :

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.9)$$

Keterangan :

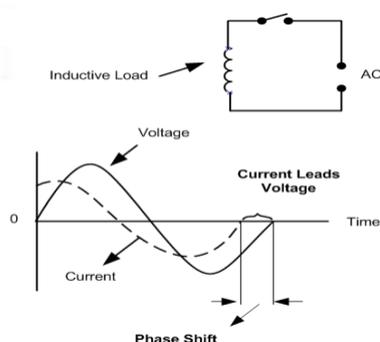
R : Resistansi (Ohm)
V : Tegangan (V)
I : Arus (I)

2.3.2 Beban Induktif

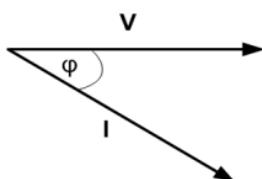
Beban induktif adalah jenis beban listrik yang terdiri dari komponen yang menghasilkan induktansi, seperti kumparan atau motor listrik. Ketika arus listrik mengalir melalui beban ini, medan magnet yang diciptakan. Namun, beban induktif juga mengonsumsi daya reaktif, yaitu listrik yang tidak dapat digunakan oleh alat dan harus dibayar oleh pelanggan. Daya reaktif ini merupakan hasil dari perbedaan fase antara arus dan tegangan dalam rangkaian listrik. Untuk beban induktif, arus

tertinggal di belakang tegangan atau sering disebut *lagging*. Beban ini memiliki dua komponen daya, yaitu daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVAR).

Beban induktif dapat menyebabkan beberapa masalah, seperti berkurangnya efisiensi dan meningkatnya biaya. Oleh karena itu, penting agar beban induktif dikelola dan dikontrol dengan baik untuk meminimalkan penggunaan daya reaktif dan meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan. Gambar 2.4 merupakan rangkaian dan bentuk gelombang dari beban induktif, lalu Gambar 2.5 merupakan bentuk dari vektor tegangan dan arus dari beban induktif.



Gambar 2. 4 Rangkaian dan Gelombang Beban Induktif
Sumber : (Ritonga, 2019)



Gambar 2. 5 Vektor Arus dan Tegangan Beban Induktif
Sumber : (Ritonga, 2019)

Kemudian di dalam beban induktif terdapat reaktansi induktif (X_L), reaktansi ini dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.10 :

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (2.10)$$

Keterangan :

X_L : Reaktansi Induktif (X_L)
 f : Frekuensi Fundamental (Hz)
 L : Induktansi (H)

Lalu untuk menghitung induktansi (L) dapat dengan menggunakan Persamaan 2.11 :

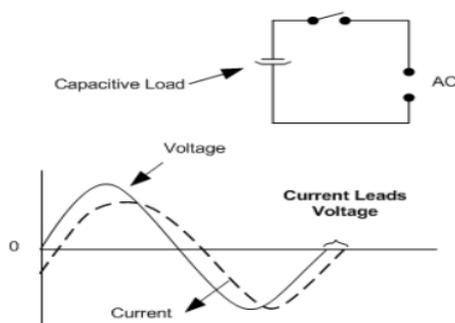
$$L = \frac{1}{2\pi \cdot f^2 C} \quad (2.11)$$

Keterangan :

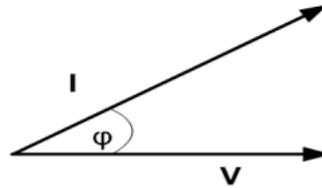
L : Induktansi (H)
 F : Frekuensi Fundamental (Hz)
 C : Kapasitansi (F)

2.3.3 Beban Kapasitif

Beban kapasitif (C) adalah beban yang memiliki kemampuan untuk menyimpan energi yang dihasilkan dari pengisian daya listrik melalui kapasitansi. Kemampuan suatu rangkaian untuk menyimpan energi yang diperoleh dari pengisian listrik (*electrical discharge*). Dalam sebuah rangkaian, terjadi pelepasan muatan listrik. Komponen ini dapat menghasilkan arus, yang mengarah ke tegangan. Beban ini menyerap daya aktif sambil melepaskan daya reaktif. Gambar 2.6 merupakan rangkaian dan bentuk gelombang dari beban kapasitif, kemudian, Gambar 2.7 merupakan vektor tegangan dan arus dari beban kapasitif.



Gambar 2. 6 Rangkaian dan Gelombang Beban Kapasitif
 Sumber : (Ritonga, 2019)



Gambar 2. 7 Vektor Arus dan Tegangan Beban Kapasitif
Sumber : (Ritonga, 2019)

Kemudian di dalam beban kapasitif terdapat reaktansi kapasitif (X_C), reaktansi ini dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.12 dan Persamaan 2.13 :

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \quad (2.12)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (2.13)$$

Keterangan :

- X_C : Reaktansi Kapasitif (X_C)
- V : Tegangan (V)
- Q_C : Daya Reaktif (VAR)
- f : Frekuensi Fundamental (Hz)
- C : Kapasitansi (F)

2.4 Kapasitor Bank

Kapasitor bank adalah suatu rangkaian kapasitor yang terhubung secara paralel dan dirancang untuk meningkatkan faktor daya sistem listrik. Fungsinya adalah untuk mengurangi rugi-rugi daya dan meningkatkan efisiensi dalam distribusi energi listrik. Kapasitor bank bekerja dengan menyediakan kapasitansi tambahan, sehingga mengimbangi daya reaktif yang dihasilkan oleh beban induktif dalam jaringan listrik. Dengan mengoptimalkan faktor daya, kapasitor bank

membantu meningkatkan kualitas daya listrik, mengurangi biaya operasional, dan memperpanjang umur peralatan listrik.

Faktor daya yang rendah berarti tagihan listrik yang lebih tinggi untuk jumlah yang sama konsumsi daya aktif (kW) yang sama untuk konsumen akhir. Akibatnya, penghematan permintaan dapat dicapai dengan meningkatkan $\text{Cos } \phi$ (Zheng and Zhang, 2018).

2.5 Rangkaian Kapasitor

Rangkaian kapasitor umumnya dibagi menjadi 2, yaitu :

2.5.1 Rangkaian Seri Kapasitor

Rangkaian seri kapasitor terdiri dari dua atau lebih kapasitor yang disusun secara sejajar dalam bentuk seri. Mirip dengan rangkaian paralel, rangkaian seri ini juga digunakan untuk mendapatkan nilai kapasitansi pengganti yang diinginkan. Namun, perhitungan dalam rangkaian seri ini lebih rumit dibandingkan dengan rangkaian paralel. Untuk menghitung total kapasitansi dari rangkaian seri kapasitor dapat menggunakan Persamaan 2.14.

$$\frac{1}{C_{Total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.14)$$

Keterangan :

- C_{Total} = Total Kapasitansi
- C_1 = Kapasitor Ke – 1
- C_2 = Kapasitor Ke – 2
- C_3 = Kapasitor Ke – 3
- C_4 = Kapasitor Ke – 4
- C_n = Kapasitor Ke – n

Bentuk dari rangkaian kapasitor seri yaitu pada Gambar 2.8:



Gambar 2. 8 Rangkaian Seri Kapasitor

2.5.2 Rangkaian Pararel Kapasitor

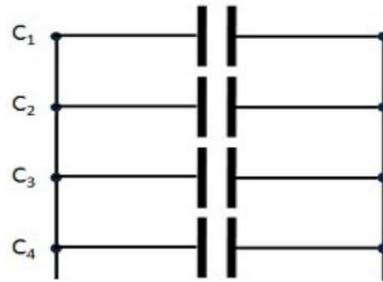
Rangkaian paralel kapasitor adalah suatu konfigurasi yang terdiri dari dua atau lebih kapasitor yang dihubungkan secara paralel. Dalam rangkaian ini, setiap kapasitor memiliki terminal yang dihubungkan pada titik yang sama pada kedua sisi sumber tegangan. Dengan menyusun kapasitor secara paralel, nilai kapasitansi total dari rangkaian akan meningkat karena kapasitansi total merupakan penjumlahan dari seluruh kapasitansi individu dari setiap kapasitor dalam rangkaian. Untuk menghitung total kapasitansi dari rangkaian paralel kapasitor dapat menggunakan Persamaan 2.15.

$$C_{Total} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + \dots + C_n \quad (2.15)$$

Keterangan :

- C_{Total} = Total Kapasitansi
- C_1 = Kapasitor Ke – 1
- C_2 = Kapasitor Ke – 2
- C_3 = Kapasitor Ke – 3
- C_4 = Kapasitor Ke – 4
- C_n = Kapasitor Ke – n

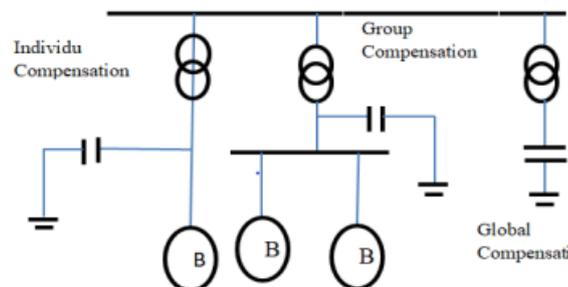
Bentuk dari Rangkaian kapasitor seri yaitu pada Gambar 2.9:



Gambar 2. 9 Rangkaian Kapasitor Pararel

2.6 Metode Pemasangan Kapasitor Bank

Ruliyanta (2022) mengemukakan terdapat tiga metode utama yang umumnya digunakan untuk melakukan pemasangan kapasitor bank sebagai kompensasi daya reaktif pada suatu beban, yaitu *global compensation*, *group compensation* dan *individual compensation*. Ketiga metode ini dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi sistem kelistrikan dan memastikan bahwa daya reaktif yang dihasilkan oleh beban dapat diminimalkan. ini menyerap daya aktif sambil melepaskan daya reaktif. *Single line diagram* dari ketiga metode pemasangan kapasitor bank dapat dilihat pada Gambar 2.10 Metode Pemasangan Kapasitor Bank.



Gambar 2. 10 Metode Pemasangan Kapasitor Bank
Sumber : (Basudewa, 2020)

2.6.1 Kompensasi Global

Metode ini dilakukan dengan memasang kapasitor bank di gardu distribusi atau pada panel utama, sehingga dapat mengurangi rugi-rugi tegangan dan daya reaktif di semua jurusan/jalur jaringan listrik. Metode ini cocok untuk sistem listrik yang memiliki banyak beban induktif yang tersebar, seperti motor, transformator, atau lampu neon.

Keuntungan dari metode ini adalah dapat mengurangi rugi-rugi daya di saluran transmisi dan distribusi, serta meningkatkan stabilitas tegangan. Namun, kelemahan dari metode ini adalah tidak dapat memberi kompensasi daya reaktif secara lokal pada setiap beban, sehingga masih ada kemungkinan terjadinya perubahan tegangan yang tidak diinginkan.

2.6.2 Kompensasi Grup

Muhammad (2018) menjelaskan bahwa, metode ini sangat membantu untuk memberikan kompensasi daya reaktif pada jumlah beban yang terhubung ke *switchgear* atau SDP yang sama, seperti motor, lampu, atau peralatan elektronik lainnya. Metode ini dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem listrik.

Keuntungan dari metode ini adalah dapat memberi kompensasi daya reaktif secara lebih akurat pada setiap kelompok beban, sehingga dapat mengurangi perubahan tegangan yang berlebihan. Namun, kelemahan dari metode ini adalah memerlukan biaya yang lebih besar untuk pemasangan dan pemeliharaan kapasitor bank, serta membutuhkan koordinasi yang baik antara kapasitor bank dan beban.

2.6.3 Kompensasi Individual

Metode ini melibatkan penempatan bank kapasitor pada setiap beban, terutama yang berdaya tinggi, seperti pada motor induksi karena kerugian utamanya yaitu faktor daya yang relatif rendah (Mugalimov et al., 2020). Pendekatan ini lebih unggul karena digunakan langsung oleh beban, sehingga lebih efektif dan secara teknis lebih baik. Pendekatan ini memiliki manfaat untuk memberikan kompensasi daya reaktif secara tepat untuk setiap beban, mengurangi kehilangan daya, meningkatkan faktor daya, dan meningkatkan kualitas tegangan. Kelemahan dari pendekatan ini adalah bahwa pendekatan ini membutuhkan sejumlah besar bank kapasitor dan perhitungan yang tepat untuk menghitung nilai kapasitansi yang sesuai dengan beban.

2.7 Perbaikan Faktor Daya

Peningkatan faktor daya menggunakan bank kapasitor adalah salah satu metode untuk meningkatkan efisiensi energi listrik. Faktor daya adalah rasio daya aktif (P) terhadap daya semu (S) yang mencerminkan seberapa baik beban menggunakan daya listrik. Faktor daya ($\cos \phi$) yang rendah menunjukkan adanya daya reaktif (Q) yang tidak efektif, yang menyebabkan rugi-rugi jaringan, penurunan tegangan, dan biaya listrik yang mahal, standar faktor daya yang diizinkan oleh PLN adalah 0,85 - 0,95, maka apabila faktor daya di bawah standar akan dikenakan denda yang akan menyebabkan pembayaran naik. Kapasitor bank adalah sekelompok kapasitor yang digunakan untuk mengimbangi daya reaktif dan meningkatkan faktor daya. Tergantung pada jenis beban dan tujuan peningkatan

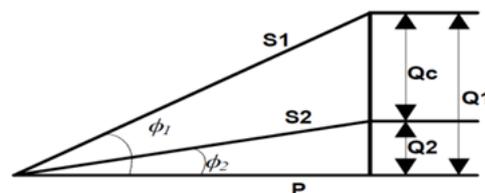
faktor daya. Kapasitor bank dapat menurunkan arus sistem secara keseluruhan dan dapat berpeluang menghemat energi.

Ketika daya reaktif yang disuplai oleh kapasitor bank memenuhi kebutuhan beban induktif, sudut fasa antara arus dan tegangan menjadi lebih kecil, sehingga faktor daya meningkat. Faktor daya yang lebih tinggi berarti lebih banyak daya nyata yang digunakan untuk menghasilkan kerja, dan lebih sedikit daya yang terbuang sebagai daya reaktif. Persamaan 2.16 digunakan untuk menghitung kebutuhan daya reaktif dari kapasitor bank yaitu :

$$Q_C = Q_1 - Q_2 \quad (2.16)$$

Keterangan :

- Q_C : Kebutuhan Daya Reaktif (VAR)
 Q_1 : Daya Reaktif Sebelum Perbaikan Faktor Daya (VAR)
 Q_2 : Daya Reaktif Setelah Perbaikan Faktor Daya (VAR)



Gambar 2. 11 Prinsip Perbaikan Faktor Daya
 Sumber : (Dani and Hasanuddin, 2018)

Gambar 2.11 merupakan prinsip dari perbaikan faktor daya. Lalu untuk menghitung nilai kapasitor dapat menggunakan Persamaan 2.12 terlebih dahulu kemudian dilanjutkan dengan Persamaan 2.17 berikut :

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} \quad (2.17)$$

Keterangan :

C : Kapasitansi (F)
 X_C : Reaktansi Kapasitif (Ohm)
 f : Frekuensi Fundamental (Hz)

Untuk melihat perbandingan faktor daya dari kedua metode kompensasi, terlebih dahulu harus dijumlahkan total faktor daya dari SDP 1 dan SDP 2 dengan menggunakan Persamaan 2.18 :

$$I_{total} = I_1(\cos\theta_1 + j \sin_1) + I_2(\cos\theta_2 + j \sin_2) \quad (2.18)$$

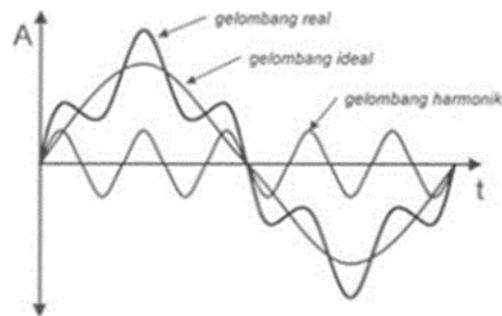
Keterangan :

I_{total} : Total Arus (A)
 I_1 : Arus Pada SDP 1
 I_2 : Arus Pada SDP 2

2.8 Harmonisa

Menurut Anu (2020) harmonisa merupakan salah satu masalah kualitas daya yang semakin meningkat yang disebabkan oleh banyaknya beban non-linier pada sistem tenaga listrik. cacat gelombang sinus yang terjadi akibat interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem dengan gelombang lain yang memiliki frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Karena frekuensi fundamentalnya adalah 50 Hz (di Indonesia), maka harmonisa kedua adalah 100 Hz, harmonisa ketiga adalah gelombang 150 Hz, dan seterusnya. Gelombang-gelombang ini menumpang pada gelombang aslinya sehingga membentuk gelombang cacat yang merupakan hasil penjumlahan antara gelombang asli dengan gelombang harmoniknya. Agar dapat memahami bentuk dari gelombang

harmonisa, dapat dilihat pada Gambar 2.12 Bentuk Gelombang Real, Ideal, dan Harmonisa.



Gambar 2. 12 Bentuk Gelombang Real, Ideal, dan Harmonisa
Sumber : (Dermawan and Rahman, 2018)

Salah satu standar harmonisa yang umum digunakan adalah IEEE Std. 519-2014 yang mengatur nilai THD (*Total Harmonic Distortion*) maksimum sesuai dengan frekuensi dasar dan rasio ISC/IL. Standar harmonisa berfungsi sebagai kriteria yang digunakan untuk menentukan batas nilai distorsi gelombang arus dan tegangan yang disebabkan oleh harmonisa. Standar harmonisa bertujuan untuk menjaga kualitas daya dan menghindari kerusakan peralatan akibat harmonisa.

2.8.1 Sumber Harmonisa

Sumber harmonisa adalah beban-beban non linier, merupakan beban yang tidak memiliki hubungan linier antara tegangan dan arus, sehingga menghasilkan gelombang arus yang tidak *sinusoidal*. Beban non linier dapat dimodelkan sebagai sumber arus yang memberikan arus harmonik ke dalam sistem tenaga. Makhijani (2020) menjelaskan bahwa, arus harmonik dalam sistem daya AC sistem dapat menyebabkan gangguan pada berbagai jenis peralatan. Umumnya harmonisa yang dihasilkan oleh semua beban non-linier adalah ganjil kelipatan dari frekuensi fundamental. Menurut Thakur (2018) Beban non linier dalam sistem daya

disebabkan oleh tindakan *switching* dan dengan demikian menyebabkan gangguan komponen arus yang berbeda yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamental. Beberapa contoh beban non linier yang sering ditemukan di industri adalah :

1. Konverter daya AC-DC, seperti unit catu daya (PSU) pada peralatan IT.
2. Lampu LED hemat energi.
3. *Variable Frequency Drive* (VFD) dan *Variable Speed Drive* (VSD), untuk mengontrol kecepatan motor.
4. Tanur busur (*arcing devices*), untuk memanaskan logam atau bahan lainnya.

Sumber harmonisa dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu sumber harmonisa internal dan sumber harmonisa eksternal. Sumber harmonisa internal adalah sumber yang berasal dari dalam sistem tenaga listrik, seperti beban *non linier* yang telah disebutkan sebelumnya. Sumber harmonisa eksternal adalah sumber yang berasal dari luar sistem tenaga listrik, seperti pembangkit listrik, jaringan transmisi, atau sistem distribusi lainnya.

2.8.2 Dampak Harmonisa

Harmonisa tegangan dan arus memiliki efek yang berbeda pada peralatan listrik yang tersambung ke listrik. Perbedaan efek harmonisa tergantung pada karakteristik listrik dari beban itu sendiri. Namun, secara umum, dampak dari harmonisa pada peralatan yaitu:

1. Meningkatkan nilai efektif tegangan dan arus. Nilai puncak tegangan dan arus meningkat.

2. Penurunan nilai frekuensi sistem. Nilai RMS yang lebih tinggi dapat menyebabkan pemanasan yang lebih tinggi pada konduktor.

Nilai puncak yang lebih besar dapat mengganggu sistem pembacaan meteran, sehingga menghasilkan akurasi pengukuran yang buruk. Frekuensi mempengaruhi impedansi kabel, yaitu semakin tinggi frekuensi, semakin sering kabel menerima tegangan puncak, sehingga nilai penurunan tegangan akan meningkat.

2.8.3 Standar Harmonisa

Mengingat dampak merugikan dari harmonisa terhadap konsumen listrik, PT. PLN (Persero), perusahaan yang bertanggung jawab atas penyediaan dan distribusi listrik di Indonesia telah menetapkan batas maksimum untuk distorsi harmonik yang dapat ditoleransi oleh peralatan listrik. Sebagai bagian dari kewajibannya untuk menjaga kualitas listrik dalam sistem tenaga listrik di Indonesia, PLN menggunakan batas distorsi harmonisa arus sebagai kriteria untuk menentukan apakah distorsi harmonisa pada sistem atau peralatan listrik masih berada dalam batas yang ditentukan atau telah melebihi batas tersebut. Pelanggan diharuskan untuk menjaga distorsi harmonisa arus pada titik sambungan pelanggan agar tetap di bawah batas yang ditentukan, dalam Tabel 2.1 standar harmonisa arus dan Tabel 2.2 standar harmonisa tegangan sesuai dengan standar IEEE 519-(2014).

Tabel 2. 1 Standar Distorsi Harmonisa Arus
Sumber : *IEEE Standard 519-2014*

<i>Maximum Harmonics Current Distortion In % IL</i>						
<i>Individual Harmonic Order (odd harmonics)</i>						
<i>Isc/L</i>	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabel 2. 2 Standar Distorsi Harmonisa Tegangan
Sumber : *IEEE Standard 519-2014*

<i>Bus Voltage V at PCC</i>	<i>Individual Harmonic Distortion (%)</i>	<i>Total Harmonic Distortion (%)</i>
V ≤ 1.0kV	5.0	8.0
1 kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5

Terdapat dua kriteria yang digunakan dalam evaluasi distorsi harmonisa. Kriteria pertama adalah batas harmonik untuk arus (THDi) pada Tabel 2.1, dan kriteria kedua adalah batas untuk tegangan (THDv) pada Tabel 2.2. Batas harmonik arus ditentukan oleh perbandingan antara I_{sc} dan I_L . I_{sc} merujuk pada hubungan singkat yang terjadi pada PCC (*Point Of Common Coupling*), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sementara itu, batas untuk harmonik tegangan ditentukan berdasarkan besarnya tegangan sistem yang digunakan atau dipasang. Nilai I_{sc} dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2.18.

$$I_{sc} = \frac{S \times 100}{\sqrt{3} \cdot Z\% \cdot V_{LL}} \quad (2.19)$$

Keterangan :

I_{sc} : Arus *Short Circuit* (A)
S : Daya Trafo (VA)

$Z\%$: Impedansi Trafo (%)
 V_{LL} : Tegangan Fasa-Fasa (V)

Untuk menentukan I_L dapat dengan menggunakan Persamaan 2.19:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi} \quad (2.20)$$

Keterangan :

I_L : Arus Beban Penuh (I)
 P : Daya Aktif (Watt)
 $\cos \varphi$: Faktor Daya
 V : Tegangan (V)

2.8.4 Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan ukuran yang menggambarkan sejauh mana bentuk gelombang ke-n menyimpang dari gelombang *sinusoidal* murni. THD didefinisikan sebagai rasio antara nilai efektif (rms) dari semua komponen harmonik terhadap nilai efektif (rms) dari komponen fundamental. THD biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase (% THD).

Untuk gelombang *sinusoidal* murni, nilai THD adalah 0%. Nilai THD ini digunakan untuk mengukur seberapa besar penyimpangan bentuk gelombang yang mengandung harmonisa dari gelombang *sinusoidal* murninya. Persamaan 2.20 digunakan untuk menghitung THD arus dan Persamaan 2.21 digunakan untuk menghitung THD tegangan:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.21)$$

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.22)$$

Keterangan :

THDi	: <i>Total Harmonic Distortion</i> dalam Arus (A)
THDv	: <i>Total Harmonic Distortion</i> dalam Tegangan (V)
I_1	: Arus Fundamental (A)
I_h	: Arus Harmonisa (A)
V_1	: Tegangan Fundamental (V)
V_h	: Tegangan Harmonisa (V)

2.9 Resonansi

Resonansi merupakan keadaan di mana reaktansi induktif (X_L) dari sistem atau dari beban dan reaktansi kapasitif (X_C) dari kapasitor bank memiliki nilai yang sama pada frekuensi harmonik tertentu. Menurut Ghifari (2013) interaksi yang terjadi ketika pemasangan kapasitor bank dengan harmonisa yang dihasilkan dari beban non linier disebut resonansi. Rangkaian distribusi pada umumnya merupakan elemen induktif, sehingga kehadiran kapasitor bank dapat menyebabkan siklus transfer energi antara elemen induktif dan kapasitif pada frekuensi resonansi, di mana pada frekuensi resonansi ini besarnya reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif sama.

2.9.1 Resonansi Seri

Resonansi seri adalah salah satu rangkaian terpenting yang digunakan dalam berbagai rangkaian listrik dan elektronik. Sebagai contoh, rangkaian ini dapat ditemukan di filter listrik AC, dan juga di penyetelan radio dan televisi karena berfungsi pada frekuensi resonansi (Abri et al., 2016).

Ketika terjadi resonansi reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif saling meniadakan satu sama lain. Jadi impedansi total rangkaian menjadi hanya nilai resistansi. Oleh karena itu dalam resonansi seri, kecil tegangan yang menarik dapat

menghasilkan arus yang tinggi karena total impedansi total rendah. Pada resonansi, arus yang dihasilkan oleh sumber akan mengalir melalui jalur impedansi rendah, kemudian jalur impedansi rendah ini menyebabkan gangguan dalam komunikasi dan distorsi tegangan yang berlebihan pada kapasitor (Abri et al., 2016).

2.9.2 Resonansi Pararel

Rangkaian resonansi paralel hampir sama dengan rangkaian resonansi seri. Kedua jenis ini memiliki titik frekuensi di mana kedua komponen reaktifnya saling meniadakan satu sama lain. Pada resonansi, kombinasi paralel bertindak seperti sirkuit. Jadi, impedansi total dari rangkaian resonansi paralel pada resonansi menjadi hanya nilai resistansi dari rangkaian dan berada pada nilai maksimum. Oleh karena itu, arus yang menarik kecil dapat menghasilkan tegangan yang besar yang dapat menyebabkan kerusakan pada kapasitor dan peralatan listrik lainnya (Abri et al., 2016).

2.10 *Electric Transient and Analysis Program (ETAP)*

ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) adalah perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini dapat digunakan secara *offline* untuk simulasi, atau secara *online* untuk manajemen data dan kontrol sistem. Perangkat lunak ini memiliki berbagai fungsi, seperti analisis pembangkit, transmisi, dan distribusi listrik.

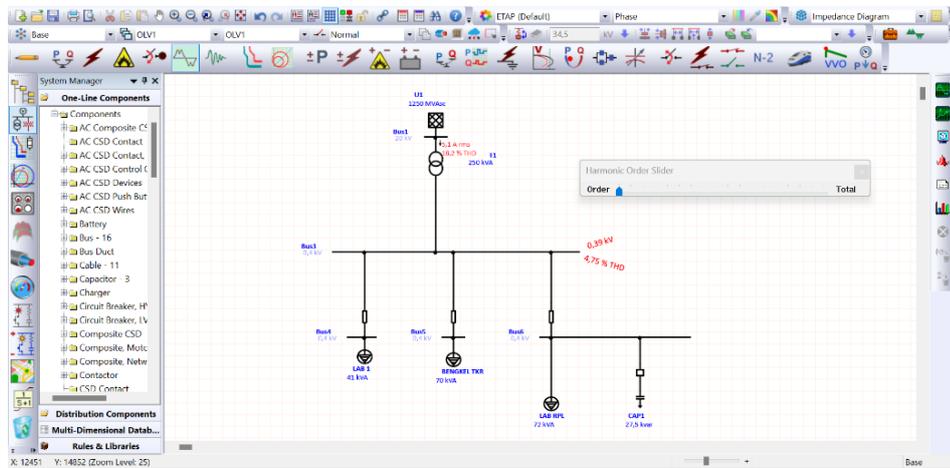
ETAP *Power Station* adalah salah satu program ETAP yang dapat menghitung aliran daya pada sistem tenaga listrik. Program ini dapat menganalisis sistem yang sangat besar. ETAP dapat membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis dan jalur pertanahan, untuk analisis aliran daya, hubung

singkat, start motor, stabilitas transien, koordinasi proteksi, dan harmonik. *ETAP Power Station* memungkinkan pengguna untuk bekerja dengan diagram satu garis.

2.10.1 Harmonic Analysis

Analisis harmonisa dalam ETAP mempunyai peran penting dalam memahami gangguan harmonik yang dapat terjadi pada sistem tenaga listrik. Harmonisa adalah fenomena yang muncul akibat adanya gelombang dengan frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasar. Gelombang-gelombang ini akan mengganggu gelombang dasar dan membuatnya tidak berbentuk *sinusoidal* murni lagi. Gelombang dasar yang mengalami distorsi inilah yang disebabkan oleh harmonisa (Yudhanto, Facta and Denis, 2021). Gelombang ini dapat dihasilkan oleh beban *non-linier* seperti peralatan elektronik modern, mesin, atau sistem pemanas induksi. Oleh karena itu, analisis harmonik dalam ETAP sangat penting untuk mengurangi efek negatif yang dapat ditimbulkan oleh gelombang harmonik ini.

Dengan menggabungkan analisis seperti aliran beban dan analisis harmonisa, ETAP membantu mengurangi risiko dan membantu perencanaan dan manajemen sistem daya, karena harmonisa yang tidak ditangani akan menyebabkan masalah yang merugikan lembaga secara teknis dan finansial (Futri, Karnoto and Zahra, 2020). Dapat dilihat pada Gambar 2.13, ketika melakukan analisis harmonisa, akan terlihat nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) pada bus atau komponen yang dipilih dalam studi kasus. Analisis ini memungkinkan kita untuk memahami sejauh mana distorsi harmonik yang ada dalam gelombang tegangan atau arus.



Gambar 2. 13 Running Harmonic Analysis

2.11 Penelitian Terkait

Penelitian mengenai perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor bank dan analisis harmonik telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Berikut Tabel 2.3 yang berisi penelitian terkait yang digunakan sebagai referensi oleh penulis :

Tabel 2. 3 Daftar Penelitian Terkait

No.	Judul	Penulis, tahun	Pembahasan Jurnal
1	<i>Long Term Effect of Power Factor Correction on the Industrial Load: A Case Study</i>	(Zheng and Zhang, 2018)	Jurnal menyajikan studi kasus tentang efek jangka panjang dari koreksi faktor daya pada beban industri. Kinerja unit koreksi faktor daya 150 kVAR yang dipasang di lokasi dipantau dan dianalisis dengan cermat. Studi ini menunjukkan pengurangan yang signifikan dalam beban induktif dan peningkatan faktor daya dari 0,87 menjadi 0,98 rata-rata. Ini juga menunjukkan efektivitas koreksi faktor daya dalam mengurangi biaya permintaan tahunan, dengan periode pengembalian kurang dari 2 tahun.
2	<i>Case Study: Power Factor Improvement and Harmonic Analysis</i>	(Makhijani et al., 2020)	Penelitian melibatkan pengukuran tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan arus harmonisa pada berbagai <i>feeder</i> , serta menggunakan perangkat lunak ETAP untuk pemodelan dan analisis. Tujuannya adalah memilih bank kapasitor yang sesuai untuk koreksi faktor daya dan memastikan bahwa sistem memenuhi standar IEEE untuk distorsi harmonisa. Studi ini juga mengidentifikasi

			kebutuhan peralatan koreksi faktor daya tambahan dan menangani masalah resonansi antara reaktansi induktif dan kapasitansi. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan bank kapasitor 2000 kVAR meningkatkan faktor daya dan menjaga harmonisa arus dan tegangan dalam batas yang dapat diterima menurut standar IEEE.
3	<i>Reactive Power Compensation by Power Capacitor Method</i>	(Muhammad, 2018)	Fokus utama dari penelitian adalah pentingnya kompensasi daya reaktif di era modern dan penekanan pada metode kapasitor daya sebagai pendekatan yang paling sesuai dan ekonomis untuk kompensasi aliran daya reaktif, dijelaskan ada 3 metode pemasangan kapasitor bank dalam jurnal ini, yaitu <i>Bulk Compensation</i> , <i>Group Compensation</i> , dan <i>Single Compensation</i> .
4	<i>Load Flow Analysis Capacitor Bank dengan Metode Kompensasi Individu dan Kompensasi Global</i>	(Ruliyanta et al., 2022)	Penelitian ini membandingkan metode kompensasi individu dan global dengan Analisis Aliran Beban untuk meningkatkan faktor daya dari 0,85 menjadi 0,99. Studi ini juga menjelaskan teori, perhitungan, dan metode pemasangan kapasitor bank. Selain itu, studi ini mengevaluasi dampak kapasitor bank terhadap biaya listrik dan memberi saran pemilihan nilai kapasitor bank yang sesuai.
5	<i>Analysis and Evaluating the Effect of Harmonic Distortion Levels in Industry</i>	(Riaz et al., 2021)	Jurnal ini membahas analisis dan evaluasi tingkat distorsi harmonik di sebuah pabrik tekstil serta pemodelan menggunakan perangkat lunak ETAP untuk menganalisis harmonik secara keseluruhan.

Penelitian terkait di atas mempunyai topik yang bersangkutan dengan topik pada tugas akhir yang Penulis angkat, akan tetapi pada penelitian yang akan dilakukan oleh Penulis memiliki *novelty* atau kebaruan tersendiri yang dapat membedakannya, berikut ini kebaruan dari penelitian Penulis :

1. Pada penelitian dalam tabel nomor 1 di atas, dijelaskan bahwa dengan menggunakan kapasitor bank sebagai kompensasi daya reaktif dapat membantu memperbaiki rata-rata faktor daya dari 0,87 menjadi 0,98. Kebaruan dari penelitian ini adalah penulis mempertimbangkan perubahan harmonisa

yang disebabkan oleh penambahan kapasitor bank, kemudian menggunakan perangkat lunak ETAP 19.01 untuk melakukan simulasi.

2. Pada penelitian dalam tabel nomor 2 di atas, dijelaskan bahwa pengukuran dilakukan pada setiap *feeder*, dan menggunakan perangkat lunak ETAP untuk pemodelan dan analisis. Kebaruan dari penelitian ini adalah penulis melakukan pengukuran pada MDP dan SDP di Rumah Sakit Umum, dan membandingkan hasil analisis dari pemasangan kapasitor bank secara *Global Compensation* dan *Group Compensation*.
3. Pada penelitian dalam tabel nomor 3 di atas, dijelaskan bahwa pentingnya kompensasi daya reaktif di era modern dan penekanan pada 3 metode kapasitor daya sebagai pendekatan yang paling sesuai dan ekonomis untuk kompensasi daya reaktif. Kebaruan pada penelitian ini adalah penulis mempertimbangkan perubahan harmonisa yang disebabkan oleh penambahan kapasitor bank ini, kemudian tidak mempertimbangkan dalam hal ekonomi seperti dijelaskan pada jurnal tersebut.
4. Pada penelitian dalam tabel nomor 4 di atas, dijelaskan bahwa membandingkan metode kompensasi daya reaktif individu dan global dengan analisis aliran beban, untuk meningkatkan faktor daya dari 0,85 menjadi 0,99. Kebaruan dari penelitian ini adalah penulis membandingkan metode kompensasi daya reaktif secara kompensasi global dan kompensasi grup untuk mencapai faktor daya yang diinginkan.
5. Penelitian pada tabel nomor 5 di atas membahas tentang analisis dan evaluasi tingkat distorsi harmonisa pada pabrik tekstil dan pemodelan menggunakan

perangkat lunak ETAP untuk menganalisis harmonisa secara keseluruhan. Kebaruan dari penelitian ini adalah penulis tidak hanya menganalisis distorsi harmonisa, tetapi juga perbaikan faktor daya di Rumah Sakit Umum.